

## Циклотрон С235-V3 для центра протонной терапии госпитального комплекса медицинской радиологии в Димитровграде

© Р.В. Галкин,<sup>1</sup> С.В. Гурский,<sup>1</sup> Y. Jongen,<sup>2</sup> Г.А. Карамышева,<sup>1</sup> М.Ю. Казаринов,<sup>1</sup> С.А. Коровкин,<sup>1</sup> С.А. Костромин,<sup>1</sup> J.-M. Calderan,<sup>2</sup> P. Cahay,<sup>2</sup> С.П. Мокренко,<sup>1</sup> Н.А. Морозов,<sup>1</sup> Н. Nkongolo,<sup>2</sup> А.Г. Ольшевский,<sup>1</sup> Y. Paradis,<sup>2</sup> Д.С. Петров,<sup>1</sup> В.М. Романов,<sup>1</sup> Е.В. Самсонов,<sup>1</sup> Е.М. Сыресин,<sup>1</sup> А.Н. Шакун,<sup>1</sup> Н.Г. Шакун,<sup>1</sup> Г.Д. Ширков,<sup>1</sup> С.Г. Ширков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
141980, Дубна, Московская область, Россия

<sup>2</sup> Ion Beam Application, Chemin du Cyclotron,  
B-1348, Louvain la Neuve, Belgium  
e-mail: syresin@nusun.jinr.ru

(Поступило в Редакцию 25 октября 2013 г.)

Одним из эффективных методов лечения онкологических заболеваний является протонная терапия. В России в ближайшие годы планируется создание нескольких центров протонной и ионной терапии. Первым таким центром будет центр протонной терапии в Димитровграде. ОИЯИ в сотрудничестве с бельгийской фирмой ИВА осуществили разработку медицинского протонного циклотрона С235-V3 для этого центра. По своим характеристикам он превосходит серийные циклотроны ИВА предыдущих модификаций, уже установленные в одиннадцати госпитальных онкологических центрах разных стран мира. В работе представлены экспериментальные результаты, а также данные расчетов динамики пучка медицинского циклотрона С235-V3. Рассмотрены причины потерь пучка в процессе ускорения, изучено влияние радиальной составляющей магнитного поля в медианной плоскости ускорителя, проанализировано влияние основных резонансов и проведены расчеты системы вывода пучка. В Дубне в 2011–2012 гг. была проведена сборка циклотрона, формирование магнитного поля, оптимизация режимов ускорения и испытания с выведенным пучком, после чего ускоритель был поставлен в Димитровград. В циклотроне С235-V3 экспериментально достигнута эффективность ускорения 72% без использования диафрагм для формирования вертикального профиля пучка и эффективность вывода 62%.

### Введение

Протонная терапия является наиболее эффективным направлением радиационной онкологии [1–5]. В России протонная терапия может быть эффективно применена для 50 000 пациентов в год. Она обладает целым рядом преимуществ перед лучевой терапией с использованием гамма-радиации и электронов. Современные технологии протонной терапии ориентированы на обеспечение максимальной конформности дозы облучения, при которой максимум формируемого дозного распределения с точностью до одного миллиметра соответствует форме облучаемой мишени. При этом доза резко падает за границами опухоли, в результате чего радиационная нагрузка на здоровые ткани существенно снижается. В конечном итоге это позволяет проводить облучение ранее не доступных для лучевой терапии локализаций, а также повысить эффективность по сравнению с результатами пассивного облучения.

Одно из направлений развития современных технологий протонной терапии связано с синхронизацией облучения и движения органов [6,7]. Облучение с выведенным из ускорителя пучком в этом случае реализуется в цикле дыхания в течение короткого времени, когда скорость перемещения облучаемого органа минимальна. Время облучения за цикл движения органа в этом случае занимает менее 1 с при длительности цикла 2–4 с. Чтобы

обеспечить стандартную дозу в технологии облучения, синхронизованного с движением органов, ток пучка на опухоли должен возрасти в 2–4 раза в соответствии с отношением длительности цикла движения органа к времени его облучения в этом цикле. Аналогичная ситуация возникает при реализации активного сканирования с модулированными по интенсивности пучками. При активном сканировании ток пучка многократно изменяется от нулевого до максимального уровня. В результате среднее значение тока примерно в 2 раза меньше, чем его максимальное значение. Разработка современных медицинских ускорителей для протонной терапии ориентирована на увеличение максимального тока пучка, выведенного из ускорителя.

В России в ближайшие годы планируется создание 3 центров протонной и ионной терапии. Первым таким центром будет центр протонной терапии в Димитровграде. ОИЯИ в сотрудничестве с бельгийской фирмой ИВА осуществили разработку медицинского протонного циклотрона С235-V3 для данного центра [8–10]. По своим характеристикам он превосходит серийные циклотроны ИВА С235 предыдущих модификаций, уже установленные в одиннадцати госпитальных онкологических центрах разных стран мира [11]. Циклотрон С235-V3 [9] конструктивно отличается от С235 по ряду систем и реализации новых ускорительных технологий. В нем оптимизирована конфигурация магнитного поля

и снижено влияние искажений медианной плоскости магнитного поля в центральной области. В ускорителе установлен модифицированный ВЧ-резонатор с измененной геометрией вблизи области вывода пучка. На основе предложений и расчетов ОИЯИ [8] в циклотроне С235-V3 реализована оптимизированная система вывода.

В 2011–2012 гг. в ОИЯИ в сотрудничестве с ФМБА для Димитровграда разработан проект 4-кабинного комплекса протонной терапии с двумя системами гантри (система транспортировки пучка к опухоли под разными направлениями), кабиной с фиксированным положением пучка, кабиной для облучения глаза, а также системой предварительного позиционирования PATLOG [9,12].

В Дубне проведены сборка циклотрона, формирование магнитного поля, выполнена оптимизация режимов ускорения протонов и проведены испытания с выведенным пучком, после чего ускоритель был поставлен в Димитровград [9,12]. Достигнутые эффективности ускорения и вывода пучка позволяют формировать в С235-V3 протонные пучки с током около  $1 \mu\text{A}$ . Это открывает возможность реализации с помощью данного ускорителя новых технологий протонной терапии, связанных с синхронизацией облучения и движения органов, а также с применением модулированных по интенсивности пучков.

## 1. Циклотрон С235-V3

В 2007 г. ОИЯИ совместно с бельгийской фирмой ИВА начали разработку специализированного медицинского циклотрона С235-V3 для протонной терапии [8–10,12]. По своим характеристикам он превосходит серийные медицинские циклотроны ИВА С235 предыдущих модификаций. С235-V3 — изохронный циклотрон на основе магнита броневоего типа [11]. Пространственная вариация магнитного поля создается четырьмя парами спиральных секторов. Ускоряющая высокочастотная система создана на основе двух резонаторов, расположенных в противоположных долинах полюсов электромагнита,



Рис. 1. Циклотрон ОИЯИ-ИВА С235-V3 в инженерном центре ОИЯИ.

Параметры циклотрона С235-V3

Энергия ускоренных протонов, MeV	232
Среднее магнитное поле, Т в центре: на радиусе вывода:	1.7 2.15
Радиус вывода, m	1.08
Магнитное поле на радиусе вывода, Т в холме в долине	2.90 0.98
Зазор, см в долине в холме	60 9.6–0.9
Периодичность структуры магнитного поля	4
Ампер-витки обмотки, kA	525
Потребляемая мощность обмотки магнита, kW	190
Вес магнита, t	210
Количество дуантов	2
Напряжение на дуантах, uV в центре на радиусе вывода	55 150
Частоты бетатронных колебаний $Q_r/Q_z$	1–1.37/ 0–0.28

систем генерации ВЧ-мощности, стабилизации и управления. Система вывода состоит из электростатического дефлектора, корректора градиента магнитного поля и фокусирующего квадрупольного дублета на основе постоянных магнитов.

Диаметр ярма циклотрона составляет 4.3 m (рис. 1), его вес — 220 t, максимальный вес неразборного элемента конструкции циклотрона — 90 t. Циклотрон имеет профилированный по высоте (эллиптический) зазор между секторами, уменьшающийся от центра к радиусу вывода с 96 до 9 mm. Вертикальная апертура дуанта составляет 20 mm.

Потребляемая ускорителем мощность электропитания составляет 450 kW. Максимальная энергия ускоренных в циклотроне протонов составляет 232 MeV. Ионный источник типа Пеннинга (PIG) с горячим катодом размещен в центре циклотрона, вводится вдоль оси магнита вертикально. Выходная щель расположена на радиусе  $\sim 15$  mm. Основные параметры циклотрона приведены в таблице.

Основные улучшения по сравнению с серийным ускорителем С235 в циклотроне С235-V3 [9] направлены на 2–3-кратное увеличение интенсивности получаемого пучка, снижение потерь на единицу тока выведенного пучка и соответственно уменьшение радиационной нагрузки на системы ускорителя.

## 2. Моделирование динамики пучка в циклотроне С235-V3

В ОИЯИ проведено компьютерное моделирование динамики пучка в С235-V3. Было установлено, что основной причиной потерь во время ускорения является наличие радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости циклотрона. На основании проведенных расчетов были выявлены опасные резонансы, которые пучок пересекает в процессе ускорения, а также сформулированы требования на низшие гармоники различных компонент магнитного поля для эффективного ускорения пучка. Проведен расчет вывода пучка из ускорителя в системе, включающей в себя электростатический дефлектор, градиент-корректор и магнитный фокусирующий канал. На основе предложений и расчетов, выполненных ОИЯИ, создана новая, более эффективная система вывода, использующая электростатический дефлектор с оптимизированной для уменьшения потерь геометрией электродов и измененной конструкцией. Это позволило повысить коэффициент вывода с 50 до 75%. Система используется на нескольких ускорителях С235 и ускорителе С235-V3.

### 2.1. Эффекты медианной плоскости

Наличие радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$  в средней плоскости циклотрона приводит к когерентному сдвигу пучка в вертикальном направлении (эффект медианной плоскости). Основной причиной присутствия  $B_r$  в плоскости  $z = 0$  являются отклонения от заданной точности в изготовлении и сборке магнитной системы ускорителя, вариация магнитных характеристик стали ярма и спиральных секторов. Особенности динамики пучка в центральной области связаны с эффектами медианной плоскости, параметрами бампа вертикальной компоненты магнитного поля (специально формируемая спадающая зависимость среднего поля от радиуса) и величиной минимального значения частоты вертикальных бетатронных колебаний  $Q_z$ . В циклотроне С235 наличие бампа, формируемого для обеспечения вертикальной фокусировки на первых оборотах, приводит из-за смены знака градиента среднего поля на радиусе 100 мм к резкому уменьшению вертикальной бетатронной частоты до уровня  $Q_z \sim 0.04-0.05$  (рис. 2).

Присутствие  $B_r$  с уровнем  $\sim 5$  Г и градиентом 3–5 Г/см в плоскости  $z = 0$  в области минимума  $Q_z$  приводит к трансформации когерентного движения частиц в этой области в последующий рост их некогерентных колебаний, который обуславливается продольным (фазовым) движением. Вертикальный размер пучка увеличивается.

Результаты численного моделирования динамики частиц в центральной области циклотрона С235-V3 в отсутствие  $B_r$  в средней плоскости и в присутствии возмущения  $B_r \sim 5$  Г приведены на рис. 3. Фазовый

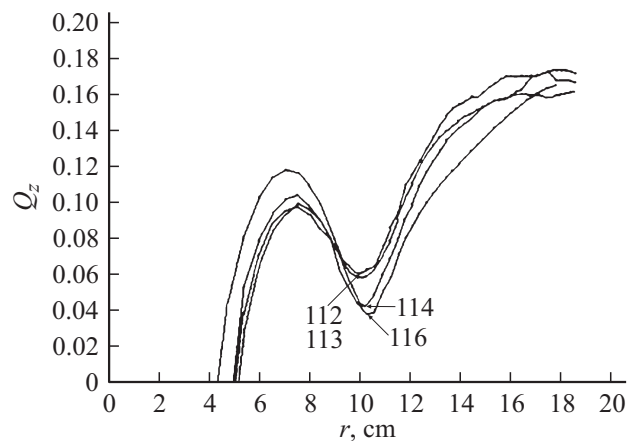


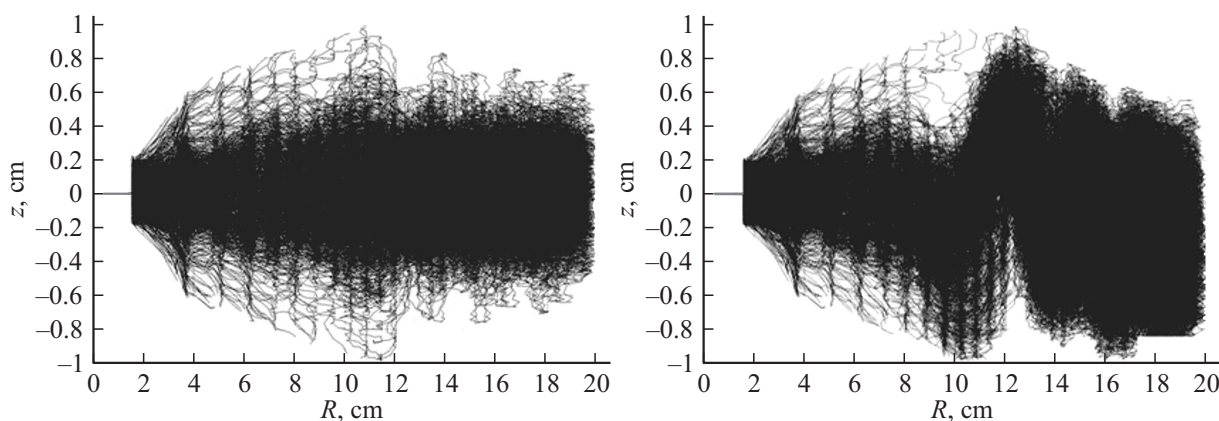
Рис. 2. Зависимость частоты вертикальных бетатронных колебаний от радиуса орбиты для трех последних циклотронов С235 фирмы ИВА (РАР-112-114) и циклотрона С235-V3 (РАР-116).

размер банча, использованного в расчетах, составляет  $40^\circ$ , начальный эмиттанс  $200 \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ . Потери протонов по вертикали в отсутствие возмущения  $B_r$  составляют 26%, наличие возмущения  $B_r$  приводит к увеличению потерь на 10%.

Наличие радиальной компоненты магнитного поля величиной  $B_r \sim 5$  Г и градиентом 5 Г/см в средней плоскости приводит к увеличению среднеквадратичного вертикального размера пучка ( $2\sigma$ ) с 8 до 15 мм.

Магнитное поле циклотрона С235-V3 в области минимума  $Q_z$  впервые оптимизировано с помощью двух процедур: установки шимм-корректоров на секторах и выбора специального несимметричного расположения верхней и нижней центральных втулок магнитной системы. Как показали расчеты, несимметричное смещение одной из двух центральных втулок на  $\Delta z_p = 0.3$  мм по вертикали приводит к появлению  $B_r \sim 4$  Г с максимумом на радиусе 50 мм в средней плоскости ускорителя. Частичная компенсация радиальной компоненты магнитного поля, возникающего из-за отклонений в точности изготовления элементов магнитной системы, несимметричным положением втулок приводит к уменьшению среднеквадратичного вертикального размера пучка на 10% для  $\Delta z_p = 0.3$  мм и соответственно на 20% для  $\Delta z_p = 0.6$  мм.

Для создания корректирующего бампа магнитного поля в области минимума  $Q_z$  в центре циклотрона применены восемь корректирующих ферромагнитных пластинок, закрепленных на внутренних концах секторов магнитной системы. С одной стороны, увеличение амплитуды бампа ведет к уменьшению градиента среднего поля, что приводит к росту минимального значения  $Q_z$ . С другой стороны, такое увеличение среднего поля в области корректирующего бампа приводит к сдвигу ВЧ-фаз протонов в направлении их отрицательных значений, что приводит к уменьшению вертикальной фокусировки частиц электрическим полем ускоряющей систе-



**Рис. 3.** Вертикальное движение пучка в центре ускорителя (начальный эмиттанс  $\varepsilon_z = 200 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ). Слева — нет радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости  $z = 0$ , справа — при наличии возмущения  $B_r \sim 5 \text{ G}$ .

мы. Таким образом, существует оптимальное значение толщины пластин, при которой обеспечивается результирующее увеличение минимального значения вертикальной бетатронной частоты  $Q_z$  на радиусе  $\sim 100 \text{ mm}$ , реализуемое при усилении магнитной и небольшом ослаблении электрической фокусировки.

Проведенный анализ динамики пучка в центральной области циклотрона С235-V3 находится в согласии с экспериментальными результатами измерений вертикального размера протонного пучка на радиусах, больших  $150 \text{ mm}$ . Двукратное уменьшение вертикального размера на радиусе  $150 \text{ mm}$  связано с уменьшением величины средней радиальной компоненты магнитного поля в области минимума  $Q_z$  путем асимметричного расположения втулок и увеличения минимального значения самой  $Q_z$  с помощью накладок на сектора. Эти действия привели к тому, что эффективность ускорения в циклотроне С235-V3 была увеличена до уровня 72% без установки ограничивающих диафрагм, которые обычно используются для формирования вертикального профиля пучка в центральной области С235.

При ускорении протонов в области больших радиусов, где апертура ускорителя уменьшается, появление радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости может приводить к потерям пучка из-за большой амплитуды некогерентных вертикальных колебаний, возникающей в центральной области ускорителя (рис. 3). Расчет ускорения пучка до области вывода показал, что наличие  $B_r \sim 3 \text{ G}$  приводит к сдвигу частиц на  $4-6 \text{ mm}$  от плоскости  $z = 0$ . При вертикальной апертуре —  $9 \text{ mm}$  и вертикальном размере пучка  $5 \text{ mm}$  такое смещение становится критическим для эффективного прохождения пучка.

В результате численного моделирования ускорения пучка протонов в циклотроне С235-V3 были изучены основные резонансы. На основе исследования прохождения резонансов в процессе ускорения сформулированы допуски на величины возмущений магнитного поля в центре, в основной зоне ускорения и на радиусах вы-

вода пучка. На основании проведенных расчетов были сделаны выводы о потенциальной опасности резонансов  $Q_r = 1$ ,  $Q_r - Q_z = 1$  и  $3Q_r = 4$ , а также сформулированы требования на низшие гармоники различных компонент магнитного поля циклотрона. Требование на амплитуду 1-й гармоники магнитного поля  $B_{z1} < 3 \text{ G}$ , налагаемое первым из этих резонансов, может быть снижено путем формирования магнитного поля таким образом, чтобы кривая  $Q_r$  в центре как можно быстрее отходила от единицы и не пересекала резонанс повторно. Для большей точности изучение эффектов влияния данного резонанса на радиальное движение пучка следует проводить совместно с учетом действия резонанса  $3Q_r = 4$ . Эффект незначительного увеличения амплитуд свободных радиальных колебаний во время прохождения резонанса  $Q_r = 1$  может быть усилен во время пересечения пучком резонанса  $3Q_r = 4$ . Второй из опасных резонансов  $Q_r - Q_z = 1$  пересекается в основной области ускорения. Требование на амплитуду 1-й гармоники радиальной компоненты магнитного поля  $B_{r1} < 5-7 \text{ G}$ , как правило, выполняется на практике при отсутствии значительных отклонений от точности изготовления и монтажа отдельных элементов циклотрона.

## 2.2. Моделирование вывода пучка

Эффективность вывода пучка — одна из важнейших характеристик циклотрона. Основными результатами расчетов вывода из ускорителя являются параметры пучка на входе в систему транспортировки, поперечный размер пучка во время прохождения через выводную систему, а также величина потерь частиц на различных элементах выводного тракта. Система вывода протонов из циклотрона С235-V3 состоит из электростатического дефлектора, корректора градиента магнитного поля и фокусирующего квадрупольного дублета на основе постоянных магнитов. Главная особенность ускорителя с точки зрения вывода пучка — малый вертикальный

зазор (9 mm) между секторами магнитной системы в районе границы полюса.

Поверхности септума (тонкой пластины-электрода электростатического дефлектора) представляют собой части окружностей. Толщина септума линейно нарастает от 0.1 mm на входе до 3 mm на выходе. Малая толщина септума на торце и его части на расстоянии 150 mm от торца вносит существенный вклад в снижение потерь при выводе пучка.

Для получения портрета пучка на входе в электростатический дефлектор моделировалось ускорение набора частиц до конечных радиусов. Затем на азимуте входа в дефлектор проводился анализ радиального положения каждой частицы: либо она попадала на высоковольтный электрод, либо на вход дефлектора, либо на его септум. Если радиус частицы был меньше радиуса расположения септума, то она ускорялась дальше до попадания в одну из указанных областей. При этом учитывалась реальная конфигурация септума: частицы, попавшие на септум со стороны циркулирующего пучка, считались потерянными. Предполагалось, что вход в электростатический дефлектор находится на азимуте  $60^\circ$ , а центр его апертуры — на радиусе 1058.5 mm, что соответствовало реальному положению дефлектора.

Потери пучка на торце септума составили  $\sim 10\%$ , потери на его внешней поверхности (со стороны циркулирующего пучка) составили  $\sim 25\%$ . Причем основное количество этих потерь происходит на первой трети длины септума.

Затем движение пучка моделировалось внутри дефлектора и далее внутри остальных элементов системы вывода. Потери на внутренних поверхностях септума и высоковольтного электрода составили еще  $\sim 5\%$ . В старой геометрии септума его толщина увеличивалась с 0.1 до 3.0 mm линейно по его длине. Расчеты, выполненные в ОИЯИ [10], показали, что если подобрать параметры окружностей, описывающих боковую геометрию септума, таким образом, чтобы обеспечивался нелинейный рост его толщины, то потери со стороны циркулирующего пучка составят 8–10% вместо 25% в старой геометрии септума. Вместе с оптимизацией радиального положения входа и выхода из дефлектора новая геометрия септума с нелинейной толщиной приводит к увеличению эффективности выводной системы до 80%.

Использование новой эффективной системы вывода пучка на базе электростатического дефлектора с улучшенной конфигурацией электродов позволило увеличить коэффициент вывода с 50% достигаемых в серийном циклотроне С235 до 75%. Новая система вывода установлена и в настоящее время используется более чем на 10 ускорителях ИВА.

### 3. Формирование магнитного поля

Ускоритель С235-V3 является изохронным циклотроном броневого типа с профилированным по высоте

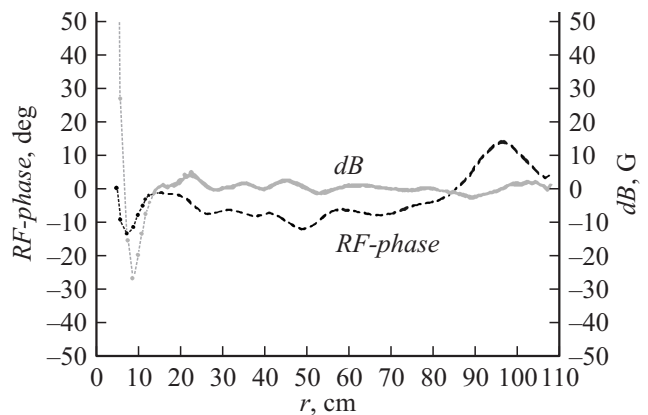


Рис. 4. Разница  $dB$  между требуемым и измеренным магнитными полями циклотрона С235-V3 после завершения шиммирования и расчетное фазовое движение в измеренном поле.

эллиптическим зазором между секторами, уменьшающимся от центра к радиусу вывода. Чтобы обеспечить захват протонов и минимизировать их потери при ускорении, предъявляются достаточные жесткие требования к изготовлению магнитной системы.

Основной целью магнитных измерений в процессе формирования и коррекции магнитного поля при помощи доработки элементов магнита циклотрона является обеспечение условия изохронизма. Кроме этого, должны быть обеспечены необходимые фокусирующие свойства магнитного поля для всего диапазона радиусов ускорения, а также выявлены возможные нарушения симметрии структуры поля относительно периодичности магнитной системы циклотрона.

Результаты обработки первой карты магнитного поля, которая была снята сразу после сборки ускорителя С235-V3 непосредственно после его изготовления на заводе, показали, что отличие среднего по азимуту магнитного поля циклотрона от требуемого изохронного поля достигает 180 G. Технологически съемные элементы секторов магнитной системы специально изготавливаются с припуском для возможности формирования магнитного поля (шиммирования) путем обработки боковых поверхностей съемных элементов и прецизионных магнитных измерений. В конце шиммирования в основной области ускорения разница между средним и изохронным полем не превышает 2–3 G (рис. 4). Расчетное фазовое движение пучка в сформированном поле находится в пределах  $\pm 15^\circ$  ВЧ.

При формировании магнитного поля в циклотроне С235-V3 реализованы три новых процедуры по сравнению с серийным циклотроном ИВА С235. Во-первых, в ОИЯИ внедрен ряд новых технологий [9], относительно используемых в ИВА. Они заключаются в прецизионной обработке поверхностей накладок секторов циклотрона с использованием сверхточных металлообрабатывающих станков с базой, в полтора раза меньшей, чем в ИВА, а также в использовании 3-мерной координатной

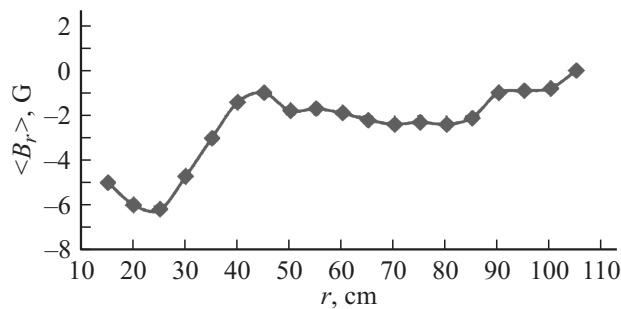


Рис. 5. Среднее значение радиальной составляющей магнитного поля  $\langle B_r \rangle$  в медианной плоскости в зависимости от радиуса.

установки с субмикронной точностью измерения качества обработанных поверхностей. Это позволяет снизить количество циклов монтажа и обработки элементов магнитной системы и соответственно общее время формирования магнитного поля, что важно при серийном производстве медицинских ускорителей. Отметим, что точность механической обработки элементов магнитной системы составила менее  $50 \mu\text{m}$ , а точность измерений координат обрабатываемых поверхностей  $\sim 1.5\text{--}2 \mu\text{m}$ .

Для калибровки датчиков измерения магнитного поля в ОИЯИ создан дипольный магнит с магнитным полем  $2.9 \text{ T}$ , соответствующим максимальному значению поля в циклотроне С235-V3 (в ИВА используется калибровочный дипольный магнит с полем  $2.5 \text{ T}$ ) и обеспечивающим калибровку датчиков Холла для прецизионных измерений поля от центра циклотрона до области вывода пучка. Для коррекции магнитного поля в ОИЯИ использована новая технология шиммирования.

Во-первых, для формирования изохронного поля в центральной области были использованы узкие по радиусу ( $10\text{--}20 \text{ mm}$ ) проточки на съемных элементах секторов со стороны средней плоскости ускорителя. Это позволило шиммировать локальные возмущения магнитного поля (протяженностью несколько десятков миллиметров по радиусу) величиной до  $40 \text{ G}$ . Конфигурация проточек определялась на основе результатов предварительных компьютерных расчетов магнитного поля системы.

Во-вторых, для улучшения динамики пучка в центральной области, связанной с эффектами медианной плоскости, параметрами бампа магнитного поля и минимальным значением  $Q_z$  (рис. 3), в циклотроне С235-V3 сформирована оптимальная конфигурация магнитного поля на радиусах  $0\text{--}200 \text{ mm}$ . Оптимизация проведена с помощью установки восьми шимм (пластин толщиной  $0.5 \text{ mm}$ ), создающих корректирующий бамп среднего магнитного поля, и смещения нижней втулки по вертикали вверх.

В-третьих, в циклотроне С235-V3 установлен новый ВЧ-резонатор, с улучшенной геометрией на радиусах вблизи области вывода пучка. Его использование потребовало изменения геометрии магнита и структуры поля

в узком диапазоне радиусов, сохраняя его параметры неизменными с точки зрения динамики пучка. Соответствующие решения были найдены с использованием трехмерных компьютерных расчетов магнитного поля, выполненных при помощи программы TOSCA.

Данные о вертикальном движении пучка в процессе ускорения, полученные при помощи визуального пробника, позволили определить значение средней по азимутам радиальной компоненты магнитного поля циклотрона  $\langle B_r \rangle$ , начиная с радиуса  $15 \text{ cm}$  (рис. 5).

#### 4. Экспериментальное исследование динамики пучка

Первым этапом пучковых испытаний циклотрона С235-V3 в ОИЯИ после формирования магнитного поля была проверка изохронизма движения частиц методом кривых Смита и Гаррена (СГ) [13,14]. Они представляют собой зависимость тока пучка на разных радиусах при небольшом изменении либо частоты ускоряющего поля около резонансного значения, либо тока возбуждения магнита вблизи его оптимального значения. При запуске циклотрона С235-V3 было использовано изменение тока магнита для измерения фазового движения пучка.

В окончательной конфигурации верхняя центральная втулка магнитной системы смещена на  $0.3 \text{ mm}$  ближе к плоскости  $z = 0$  относительно начального положения. Положение нижней втулки осталось неизменным. При этом верхняя втулка находится на  $1.3 \text{ mm}$  ближе к средней плоскости, чем нижняя, что корректирует радиальную компоненту величиной  $\sim 5\text{--}7 \text{ G}$ . Фазовое движение пучка, рассчитанное на основании кривых Смита и Гаррена для конечной конфигурации магнитного поля, показано на рис. 6.

Амплитуда фазового движения хорошо согласуется с данными, полученными путем анализа структуры сформированного поля (рис. 4). Разный наклон кривых

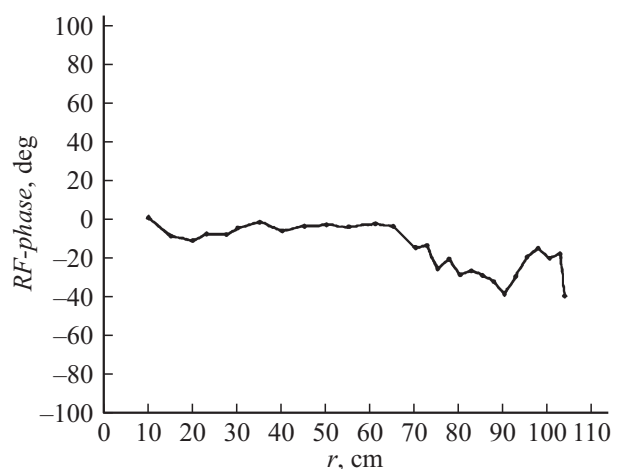
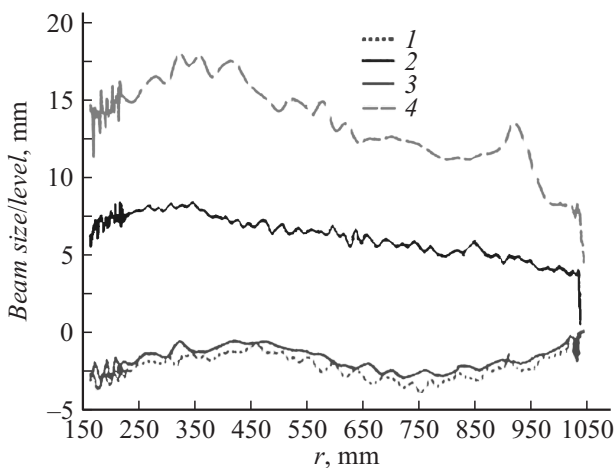


Рис. 6. ВЧ-фаза пучка, рассчитанная на основе кривых Смита и Гаррена для тока в основной обмотке  $760.7 \text{ A}$  и резонансной частоты  $106.27 \text{ MHz}$ .



**Рис. 7.** Вертикальный размер пучка (кривая 1) и соответственно положение центра тяжести пучка (кривая 2) до установки шимм и коррекции эффектов медианной плоскости и после (кривая 3) и соответственно для центра тяжести пучка (кривая 4).

фазового движения на рис. 6 и 4 связан с различными значениями тока основных обмоток электромагнита циклотрона и разной частотой ускоряющей системы.

Лучшая трансмиссия пучка от центра до входа в систему вывода  $\sim 72\%$ , эффективность вывода  $\sim 62\%$  были получены при токе в основной обмотке  $760.7 \text{ A}$  и резонансной частоте  $106.27 \text{ MHz}$ .

Следует отметить, что в процессе шиммирования магнитного поля циклотрона и его запуска значение оптимальной частоты ускоряющего поля изменялось в следующей последовательности:  $106.420 \rightarrow 106.280 \rightarrow 106.269 \rightarrow 106.270$ . Последние два значения характеризуют расчетную частоту, выбранную по результатам формирования изохронного поля, и экспериментальную частоту, выбранную по лучшей трансмиссии пучка соответственно.

При малых значениях бетатронной частоты  $Q_z \sim 0.04$  на радиусе  $\sim 100 \text{ mm}$  (рис. 2) и наличии средней радиальной компоненты магнитного поля в области минимума  $Q_z$  наряду с когерентным смещением пучка в соответствии с  $z \sim r(B_r/BQ_z^2)$  возникают как когерентные, так и некогерентные колебания, сохраняющиеся при последующем ускорении. В результате этого среднеквадратичный вертикальный размер пучка на радиусах  $150\text{--}200 \text{ mm}$  составляет  $\sim 17\text{--}18 \text{ mm}$  (рис. 7) и становится сравнимым с вертикальной апертурой ускорителя  $20 \text{ mm}$ , определяемой зазором между дуантами.

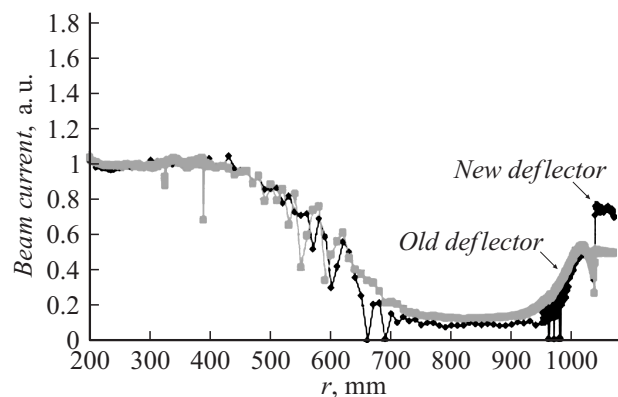
При дальнейшем ускорении протонов в области больших радиусов, где апертура ускорителя уменьшается, появление  $B_r$  в средней плоскости приводит к потерям пучка из-за большой амплитуды некогерентных колебаний, возникающей в центральной области ускорителя (рис. 3). В результате эффективность ускорения в серийных циклотронах С235 обычно составляет не более  $50\%$ .

Для уменьшения потерь ускоренных протонов и снижения уровня наводимой на внутренних системах ускорителя радиационной активности в центральной области серийных циклотронов С235 на радиусах  $100\text{--}150 \text{ mm}$ , когда энергия протонов  $\sim 2 \text{ MeV}$ , устанавливается диафрагма с ограничительной вертикальной апертурой  $6 \text{ mm}$ . При ее использовании эффективность ускорения от радиуса  $300$  до  $1030 \text{ mm}$  (радиус вывода) составляет  $90\%$ . Однако при максимальном токе протонного пучка перед диафрагмой  $2.5 \mu\text{A}$  ток ускоренного пучка после нее составляет около  $750 \text{ nA}$ . В результате при эффективности вывода  $50\%$  ток выведенного пучка в соответствии со спецификацией циклотрона С235 равен  $300 \text{ nA}$ .

В циклотроне С235-V3 магнитная система в области минимума  $Q_z$  впервые оптимизирована с помощью установки шимм-корректоров на секторах и выбора специального несимметричного расположения верхней и нижней центральных втулок магнитной системы. В результате оптимизации вертикальный размер протонного пучка на радиусах  $150\text{--}200 \text{ mm}$  был уменьшен в 2 раза и составил  $\sim 7\text{--}8 \text{ mm}$  (рис. 7). Это привело к тому, что эффективность ускорения в циклотроне С235-V3 была увеличена до уровня  $72\%$  без установки ограничивающих диафрагм.

Оптимизация магнитного поля в центральной области циклотрона С235-V3 позволила в 2 раза увеличить ток ускоренных протонов по сравнению с серийным циклотроном С235.

Главная особенность ускорителей С235 и С235-V3 с точки зрения вывода пучка — малый вертикальный зазор ( $9 \text{ mm}$ ) между секторами магнитной системы в районе границы полюса. Использование разработанного в ОИЯИ дефлектора с оптимизированной конфигурацией септума позволило повысить эффективность вывода протонного пучка с  $50\%$ , реализуемую в серийном циклотроне ИВА С235, до  $75\%$  (рис. 8), достигнутую в последних модифицированных версиях этого циклотрона.



**Рис. 8.** Зависимость тока пучка (нормированная на величину тока на радиусе  $300 \text{ mm}$ ), измеренного пробником, от радиуса для циклотрона С235 со старой и новой системами вывода, разработанной в ОИЯИ.

## Заключение

Таким образом, основные усилия при создании и запуске циклотрона С235-V3 были ориентированы на 2–3-кратный рост интенсивности выведенного пучка по сравнению с серийным циклотроном ИВА С235. Решение этой задачи открывает возможность реализации с помощью данного ускорителя новых технологий протонной терапии, дающих наилучшие результаты и использующих протонные пучки с интенсивностью до  $1 \mu\text{A}$ : облучение с синхронизацией экспозиции пучка и движения органов, активное сканирование модулированным по интенсивности тонким пучком, облучение опухолей большого объема, использование методики облучения с увеличенной дозой за один сеанс и сниженном общем количестве сеансов.

## Список литературы

- [1] *Kogelnik H.D.* // In: *Advances in Hadron therapy*. Amsterdam: Elsevier, 1997. P. 12.
- [2] *Савченко О.В.* // *Медицинская физика*. 2007. № 3. С. 60–67; № 4. С. 53–62.
- [3] *Кленов Г.И., Хорошков В.С.* // *Медицинская физика*. 2005. № 4. С. 5.
- [4] *Абросимов Н.К.* и др. // *Известия АН СССР*. 1985. № 5. С. 84.
- [5] *Агапов А.В.* и др. // *Письма в ЭЧАЯ*. 2005. № 6. С. 80.
- [6] *Pedroni E.* // *PTCOG 47*. Jacksonville, 2008.
- [7] *Marchand B.* et al. // *EPAC 2000*. Vienna. Austria. P. 2539.
- [8] *Енген И., Карамышева Г.А., Костромин С.А., Морозов Н.А., Самсонов Е.В., Сыресин Е.М., Ширков Г.Д., Ширков С.Г.* // *Письма в ЭЧАЯ*. 2010. Т. 7. № 7 (163). С. 821.
- [9] *Gursky S., Karamyshcheva G., Kostromin S., Kazarinov M., Korovkin S., Mokrenko S., Morozov N., Olshevsky A., Romanov V., Samsonov E., Shakun N., Shirkov G., Shirkov S., Syresin E.* // *RUPAC-12*. P. 221.
- [10] *Карамышева Г.А., Карамышев О.В., Костромин С.А., Морозов Н.А., Самсонов Е.В., Сыресин Е.М., Ширков Г.Д., Ширков С.Г.* // *ЖТФ*. 2012. Т. 82. Вып. 1. С. 107.
- [11] <http://www.iba-worldwide.com>
- [12] *Сыресин Е.М.* *Сцинтилляционные материалы*. Инженерия, устройства, применения, Харьков: ИСМА, 2013. С. 1.
- [13] *Garren A.A., Smith L.* // *Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Sector-Focused Cyclotrons and Meson Factories*. Geneva, 1963. P. 18–23.
- [14] *Herve M.* *How to Use Smith and Garren Curves to Correct Isochronism*, IBA internal report, 1993.